

# 水压法与电通量法评价低热水泥道路混凝土渗透性

丁 浩<sup>1</sup>, 吴笑梅<sup>1,2</sup>, 樊粤明<sup>1,2</sup>, 徐俊杰<sup>1</sup>, 赖剑华<sup>3</sup>

(1. 华南理工大学 材料学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 特种功能材料及制备技术教育部重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 广东省塔牌集团股份有限公司技术中心, 广东 梅州 514000)

**摘要:** 分别采用水渗透压力法和快速氯离子直流电通量法, 测试了由低热硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥配制的道路混凝土的渗透性能, 并对导致两种测试方法结果不同的原因进行了分析. 结果表明: 低热水泥道路混凝土在 28 d, 60 d 和 90 d 三个龄期的电通量值都大于普通硅酸盐水泥道路混凝土, 抗渗性劣于普通硅酸盐水泥混凝土, 差异较显著; 水压法试验结果表明, 28 d 龄期低热水泥道路混凝土的抗渗性略逊于普通硅酸盐水泥道路混凝土, 而 60 d 龄期后, 则略优于普通硅酸盐水泥配制的道路混凝土. 分析认为水压力渗透法能较真实地反映混凝土中的孔结构, 电通量法的结果因受到浆体材料及水化产物组成对氯离子固化的影响, 在反映混凝土的抗渗性能或孔结构的差异方面存在一定的偏差.

**关 键 词:** 低热硅酸盐水泥; 抗渗性能; 快速氯离子电通量法; 水压法

**中图分类号:** TU528.37

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2009)01-0095-05

随着国民经济的发展和社会运输市场的繁荣, 公路交通建设任务日益增大, 预计到 2010 年全国水泥混凝土路面建设的总长度将超过 200 万 km<sup>[1]</sup>, 而目前的现状是新建的水泥混凝土公路往往 3 ~ 5 年就出现了断板、坑洼等严重破坏, 破损的混凝土路面每年造成直接和间接经济损失达 24.01 亿元<sup>[2]</sup>, 道路混凝土耐久性的研究已成为水泥混凝土材料科学发展的重点和热点.

目前, 渗透性是评价混凝土耐久性的重要指标, 实验室主要采用水压力渗透法<sup>[3]</sup>和快速氯离子直流电通量法<sup>[4]</sup>来测定和研究混凝土的渗透性能. 不同学者对上述两种方法的适用性有不同的观点, 有的认为水渗透法较好地模拟了实际情况, 反应了混凝土孔内结构特征, 而有的认为氯离子电通量法不仅方便快捷, 而且反映了材料的致密程度和混凝土成分与氯离子的化学反应能力, 最能直接反映混凝土的耐久性能. 本文利用上述两种方法测试低热水泥和普通硅酸盐水泥配置的道路混凝土的渗透性, 分析两种渗透测试方法对低热水泥道路混凝土和普通硅酸盐水泥道路混凝土的适用性, 并为低热硅酸盐水泥配置道路混凝土的可行性提供一定的理论依据.

## 1 实验原材料及方法

实验原材料包括: 水泥, 四川嘉华水泥厂生产的低热硅酸盐水泥 P·I42.5、粤秀 P·O42.5R 级水泥和广英 P·O42.5R 级水泥, 熟料矿物组成和水泥的物理性能见表 1, 分别以 C1、C2、C3 表示; 细集料, 西江河砂, 细度模数 2.8, II 区级配; 粗集料, 花岗岩碎石, 5 ~ 40 mm 连续级配, 压碎指标 10%, 针片状含量 5.8%; 减水剂, 柯杰牌早强型萘系高效减水剂, 减水率 20%, 固含量 30%.

道路混凝土的设计抗折强度为 4.5 MPa, 3 种混凝土配合比除外加剂掺量不同外其余均相同, 坍落度控制在 20 ~ 40 mm, 采用的胶凝材料分别为 C1、C2、C3, 相对应的混凝土记为 1#、2#、3#, 其组成见表 2.

收稿日期: 2008-06-22

作者简介: 丁 浩(1983-), 男, 安徽蚌埠人, 硕士, 主要从事混凝土材料研究. E-mail: ding\_hao1@mail.scut.edu.cn

表 1 水泥的物理性能及熟料的矿物组成  
Tab.1 Physical properties of cement and composition of clinker

| 水 泥            | 细 度<br>/ % | 标 准<br>稠 度<br>/ % | 凝 结 时 间<br>/ min |     | 比 表 面 积<br>m <sup>2</sup> / kg | 抗 压 强 度<br>/ MPa |      | 抗 折 强 度<br>/ MPa |      | 熟 料 的 矿 物 组 成 / % |                  |                  |                   |
|----------------|------------|-------------------|------------------|-----|--------------------------------|------------------|------|------------------|------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
|                |            |                   | 初 凝              | 终 凝 |                                | 3 d              | 28 d | 3 d              | 28 d | C <sub>3</sub> S  | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
| C <sub>1</sub> | 2.0        | 24.8              | 130              | 175 | 410                            | 12.3             | 45.4 | 3.1              | 7.3  | 23.72             | 49.62            | 3.37             | 16.01             |
| C <sub>2</sub> | 1.8        | 24.8              | 125              | 175 | 387                            | 29.8             | 53.3 | 6.0              | 8.2  | 54.36             | 20.17            | 7.77             | 15.54             |
| C <sub>3</sub> | 2.2        | 24.4              | 130              | 180 | 392                            | 29.0             | 49.8 | 5.5              | 7.6  | 56.44             | 19.89            | 9.03             | 9.11              |

表 2 混凝土拌合物组份  
Tab.2 Mix proportions of concrete

| 编 号 | 各 组 份 含 量 / ( kg · m <sup>-3</sup> ) |       |       |     |     |       | 坍 落 度<br>/ mm | 28 d 强 度 / MPa |      |
|-----|--------------------------------------|-------|-------|-----|-----|-------|---------------|----------------|------|
|     | 水 泥                                  | 1-3 石 | 瓜 米 石 | 砂   | 水   | 减 水 剂 |               | 抗 折            | 抗 压  |
| 1#  | 350                                  | 921   | 307   | 688 | 147 | 6.30  | 20~40         | 4.6            | 43.2 |
| 2#  | 350                                  | 921   | 307   | 688 | 147 | 5.60  | 20~40         | 4.8            | 46.1 |
| 3#  | 350                                  | 921   | 307   | 688 | 147 | 5.95  | 20~40         | 4.6            | 45.0 |

用强制式搅拌机成型上底为 Φ175 mm、下底 Φ185 mm,高为 150 mm 标准圆台试块和 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试块,并在测试时切割成 Φ100 mm×50 mm 的试块,标准养护到试验龄期 28 d,60 d 和 90 d,参照规范<sup>[3,4]</sup>测试混凝土的渗透性能;并用压汞法测试混凝土砂浆的孔隙率;采用化学结合水法测定水泥净浆的水化程度<sup>[5]</sup>.

2 试验结果与讨论

2.1 水压法试验结果

水压法测得的各试样渗透高度及换算后的渗透系数见表 3. 可见,随着龄期的增加,试样的渗透高度和渗透系数逐渐减小,在水压法中 28 d 龄期 1#混凝土的渗透深度大于 2#、3#,抗渗能力稍逊,而 60 d 龄期后则略优于 2#、3#的抗渗性能,但差距不大.

表 3 水压法测得的混凝土抗渗结果  
Tab.3 Testing results of pavement concrete impermeability

| 龄期/d | 1#           |                                    | 2#           |                                    | 3#           |                                    |
|------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|
|      | 渗透高度<br>/ mm | 渗透系数<br>/ ( cm · h <sup>-1</sup> ) | 渗透高度<br>/ mm | 渗透系数<br>/ ( cm · h <sup>-1</sup> ) | 渗透高度<br>/ mm | 渗透系数<br>/ ( cm · h <sup>-1</sup> ) |
| 28   | 40.8         | 1.28×10 <sup>-6</sup>              | 39.0         | 1.16×10 <sup>-6</sup>              | 39.3         | 1.18×10 <sup>-6</sup>              |
| 60   | 34.2         | 0.90×10 <sup>-6</sup>              | 34.9         | 0.93×10 <sup>-6</sup>              | 35.5         | 0.97×10 <sup>-6</sup>              |
| 90   | 31.0         | 0.74×10 <sup>-6</sup>              | 32.7         | 0.82×10 <sup>-6</sup>              | 32.3         | 0.80×10 <sup>-6</sup>              |

1#试样由低热硅酸盐水泥配制而成,贝利特矿物含量高,早期水化速率慢. 由净浆水化速率(见图 1)可知,在条件相同的情况下,28 d 龄期时低热硅酸盐水泥的水化程度最低,水化产物少,导致浆体的胶凝性和配制的混凝土致密性较差. 各试样 28 d 龄期的孔隙率和平均孔径(见表 4)及砂浆孔径含量分布(见图 2)也证明了这一点. P. K. Mehta 认为混凝土中大于 100 nm 的孔会影响混凝土的渗透性能<sup>[6]</sup>;吴中伟院士的研究也表明增加 50 nm 以下的孔,减少 100 nm 以上的孔可大大改善混凝土的抗渗性能<sup>[7]</sup>;日本寺村悟和板井悦郎认为影响混凝土渗透性的孔径为 50 nm~10 μm<sup>[8]</sup>. 因此,28 d 龄期时 1#试样抗渗性差,而随着龄期的增加,水化产物不断增加,水化产物的增多改善了孔结构和孔径分布,至 90 d 龄期时 1#试样中 50~100 nm 的孔和大于 100 nm 的孔的含量都少于 2#、3#试样,因此,其渗透深度最小,表现出良好的抗渗性能. 由此可见,混凝土试样的抗渗性能与其内部的孔结构有良好的对应性.

表4 试样的孔隙率及平均孔径

Tab.4 The porosity and average pore size of different specimen

| 试样 | 龄期/d | 总压入汞量/( $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | 平均孔径/nm | 孔隙率/%  |
|----|------|-------------------------------------------|---------|--------|
| 1# | 28   | 0.0702                                    | 24.2    | 15.503 |
|    | 90   | 0.0577                                    | 18.2    | 13.217 |
| 2# | 28   | 0.0633                                    | 22.1    | 13.182 |
|    | 90   | 0.0560                                    | 18.4    | 12.596 |
| 3# | 28   | 0.0676                                    | 22.7    | 13.652 |
|    | 90   | 0.0588                                    | 19.4    | 13.175 |

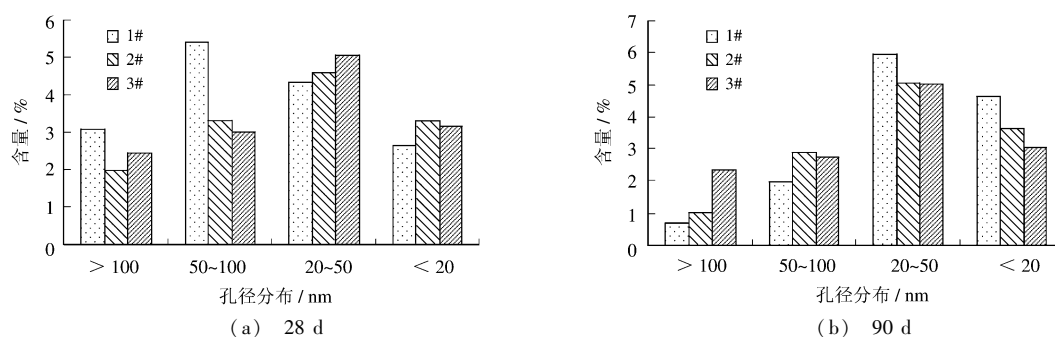


图2 28 d 和 90 d 龄期混凝土砂浆的孔径分布

Fig.2 Pore size distribution of concrete mortar at 28 d and 90 d ages

## 2.2 电通量法试验结果

各龄期通过的电量值见图3。可见,1#样各龄期通过的电量值都大于2#、3#,各试样通过的电量值随着龄期的延长都呈下降趋势,而降幅以1#样最大,降幅为17.91%,2#降幅为13.75%,3#为14.22%。这是因为随着龄期的增加,胶凝材料的水化程度加深,改善了孔结构,提高了混凝土的抗渗性能,从而减小了通过的电量值。需指出的是,90 d 龄期时各试样测得的电通量值所表征的孔结构与 P. K. Mehta 等人<sup>[5]</sup>提出的影响混凝土渗透性的孔结构并不一致。

## 2.3 两种测试方法的比较

两种测试方法在对本实验混凝土试样的测试结果差异较大,在快速氯离子直流电通量法中,抗渗性能以3#样最好,1#样最差,尤其在28 d 龄期时,1#样的氯离子渗透等级属于高等级,差距较显著;而在水渗透压力法中,28 d 龄期时,1#样的渗透深度最大,而60 d 龄期后,1#样的渗透深度最小,3#样最大,1#抗渗性能略优于2#、3#,但差距较小。根据众多学者<sup>[9,10]</sup>关于混凝土对氯离子的固化结合性能的研究结果,笔者认为电通量法主要是用来评价混凝土对氯离子的抗渗性,结果因受到胶凝材料的矿物组成及水化产物对氯离子固化能力的影响,在反映混凝土的抗渗性能或孔结构的差异方面存在一定的偏差,胶凝材料的水化产物通过物理、化学吸附方式吸附一定量的氯离子,从而影响结果的准确性。分析认为造成测试结果不同的原因主要有:

(1)  $\text{C}_3\text{A}$  水化产物的形成对  $\text{Cl}^-$  产生化学吸附 根据《水泥化学》知识<sup>[11]</sup>可知, $\text{C}_3\text{A}$  水化时会先形成配位阳离子  $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]^+$  八面体层状结构,再通过电荷引力吸附孔液中的氢氧根离子而形成  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  及其衍生物,结构式中的氢氧根是通过离子间的电荷引力维持稳定的,离子键相对较弱,八面体以外的氢氧根团也会被其他的阴离子所取代,生成其他相应的盐,而氯离子可以置换  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  内层的氢氧根,生成 F 盐<sup>[12]</sup>。因此, $\text{C}_3\text{A}$  的水化产物及衍生物能够对  $\text{Cl}^-$  进行化学吸附, $\text{C}_3\text{A}$  的含量大小会影响化学吸附氯离子的多少,罗

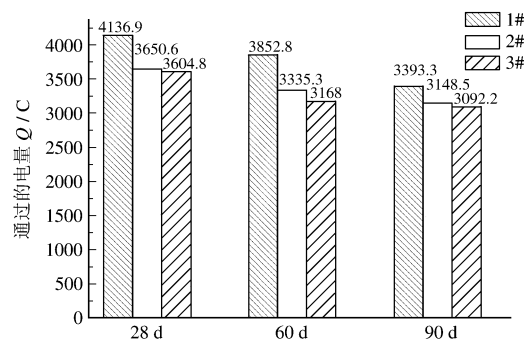


图3 不同龄期时试样通过的电量

Fig.3 Passed electric quantity of the samples

睿、马昆林等<sup>[10,13]</sup>的研究也证实了此理论. 通过对 3 种试样胶凝材料的矿物组成分析可得, 胶凝材料中的  $C_3A$  含量 3#最高, 2#次之, 1#含量最少, 因此, 混凝土对通过的氯离子的化学吸附结合的能力以 3#样最强, 1#样最弱, 在各龄期的氯离子抗渗试验中 3#表现出良好的抗渗性, 而 1#则表现出较差的抗渗性. 因此, 用电通量法对比抗渗性能的差异时, 与高  $C_3A$  含量的水泥相比往往数据偏大, 结果只是客观地评价氯离子在混凝土中的渗透性能, 而不能真实反映混凝土的孔结构对其它介质(如纯水)渗透性能的影响.

(2) 双电层的形成会增强对氯离子的物理吸附能力 胶凝材料的水化产物能有选择性地吸附带电离子, 形成紧密层和漫散层, 而在水化产物中形成双电层结构, 双电层结构的形成会增强水化产物对氯离子的物理吸附能力<sup>[14]</sup>. 由于 1#样的胶凝材料水化程度低, 形成的水化产物少, 对氯离子的物理吸附能力较 2#、3#样差, 通过的电量值最大,  $Cl^-$  渗透等级最高; 随龄期的增加, 低热硅酸盐水泥中未水化的贝利特矿物持续水化, 水化程度的加深使得胶凝材料的水化产物逐渐增多, 改善了孔结构, 增强了氯离子的物理吸附能力, 故 1#样电通量值的降幅最大.

(3) 混合材的掺入增强了对氯离子的物理吸附能力 从胶凝材料本身考虑, C1 是不添加任何混合材的由纯熟料磨制而成, 而 C2、C3 添加了一定量的混合材料, 据厂家提供的资料, C2、C3 所含有的 15% 的混合材主要是粉煤灰和少量石灰石. 由于粉煤灰表面呈多孔性, 对氯离子产生物理吸附, 降低了氯离子的渗透能力, 降低一定时间内通过的电量值. 因此, 2#、3#样的电量值相对较小, 并且许多学者的研究<sup>[14]</sup>也表明像石灰石粉、粉煤灰、矿渣等的加入都会增强混凝土对氯离子的物理和化学吸附能力.

综上所述, 水渗透法能较好地模拟实际情况, 反映混凝土的孔内结构特征. 该试验方法的缺点在于操作繁重复杂, 只适用于低渗透的混凝土, 不易测试高性能混凝土, 在区分高等级渗透性能时不够灵敏. 快速氯离子直流电通量法因快速、轻巧而受到人们的青睐, 并且对于较高抗渗等级的试样, 能够显示出其抗渗性能的差异而被广泛采用, 但由于该方法易受到孔溶液成分及两端直流电压在通电时产生热量引发温升的影响, 导致氯离子的扩散运动加速从而影响测试结果准确性.

### 3 结 语

(1) 快速氯离子直流电通量法的测试结果因受到胶凝材料的矿物组成及水化产物对氯离子固化能力的影响, 在反映混凝土的抗渗性能或孔结构的差异方面存在一定的偏差; 而水渗透压力法能较好反映本试验配制的道路混凝土的孔结构和抗渗性能;

(2) 低热硅酸盐水泥配制的道路混凝土, 由于胶凝材料中贝利特矿物含量高, 水化速率慢, 28 d 龄期时水化程度低、水化产物少, 配制的道路混凝土胶凝性和密实性差, 抗渗性差, 而随着龄期延长, 水化程度加深, 水化产物增多, 改善了混凝土的孔结构, 提高了密实性, 所配制混凝土的抗渗性略优于普通硅酸盐水泥道路混凝土, 利于提高耐久性和路面的实用寿命, 将其应用于道路混凝土具有一定的实际工程意义和应用前景.

### 参 考 文 献:

- [1] JTG F30-2003, 公路水泥混凝土路面施工技术规范[S]. (JTG F30-2003, Technical Specification for Construction of Highway Cement Concrete Pavements[S]. (in Chinese))
- [2] 何启群, 李永华. 公路水泥混凝土路面板损坏机制分析与综合防治对策研究[J]. 华东公路, 2003, (3): 49-50. (HE Qi-qun, LI Yong-hua. Highway cement concrete pavement damage mechanism analysis and comprehensive control countermeasures[J]. East China Highway, 2003, (3): 49-50. (in Chinese))
- [3] GBJ82-85, 混凝土长期性和耐久性试验方法[S]. (GBJ82-85, Standard for Test Methods of Long-Term Performance and Durability of Ordinary Concrete[S]. (in Chinese))
- [4] ASTM C1202-1997, 快速氯离子渗透试验方法[S]. (ASTM C1202-1997, Rapid Testing Method of Chloride Permeability [S]. (in Chinese))

- [5] 杨东生. 水泥工艺实验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 53–55. (Yang Dong-sheng. Standard Test Method of Cement Technological[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1985: 53–55. (in Chinese))
- [6] 赵铁军, 朱金铨, 冯乃谦. 混凝土孔隙分析中的表征参数[J]. 水泥基复合材料科学与技术, 2000, (3): 5–11. (ZHAO Tie-jun, ZHU Jin-quan, FENG Nai-qian. Characterization parameters on concrete porosity analysis [J]. **Cement-Based Composite Materials Science and Technology**, 2000, (3): 5–11. (in Chinese))
- [7] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 114–116. (WU Zhong-wei, LIAN Hui-zhen. High Performance Concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999: 114–116. (in Chinese))
- [8] 赵铁军. 混凝土渗透性[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 29–33. (ZHAO Tie-jun. Concrete Permeability[M]. Beijing: Science Press, 2005: 29–33. (in Chinese))
- [9] 马昆林, 谢友均, 刘灿, 等. 混凝土固化氯离子影响因素的研究[J]. 混凝土, 2004, (6): 21–22. (MA Kun-lin, XIE You-jun, LIU Can, *et al.* Experimental study on the influence of concrete resistance to chloride ingress[J]. **Concrete**, 2004, (6): 21–22. (in Chinese))
- [10] 罗睿, 蔡跃波, 王昌义, 等. 磨细矿渣抗氯离子侵蚀性能的机理研究[J]. 土木工程学报, 35(6): 100–101. (LUO Rui, CAI Yue-bo, WANG Chang-yi, *et al.* The mechanism of ground granulated blast-furnace slag to resist chloride corrosion [J]. **China Civil Engineering Journal**, 35(6): 100–101. (in Chinese))
- [11] Taylor H F W. Cement Chemistry[M]. London: Academic Press, 1990: 164–167.
- [12] F M 李, 唐明述, 杨南如, 胡道和译. 水泥混凝土化学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1980: 248–251. (F M Li, TANG Ming-shu, YANG Nan-ru, HU Dao-he Translated. Cement Concrete Chemistry[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1980: 248–251. (in Chinese))
- [13] 胡红梅, 马保国. 矿物功能材料的  $\text{Cl}^-$  结合能力[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(4): 409–410. (HU Hong-mei, MA Bao-guo. Binding capability of mineral functional materials with chloride ion[J]. **Journal of Building Material**, 2004, 7(4): 409–410. (in Chinese))
- [14] 马烨红. 石灰石粉作混凝土矿物掺合料的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005. (MA Ye-hong. The study of limestone as concrete admixture[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2005. (in Chinese))

## Permeability of low-heat cement pavement concrete using water permeability pressure test and rapid chloride penetrability test

DING Hao<sup>1</sup>, WU Xiao-mei<sup>1,2</sup>, FAN Yue-ming<sup>1,2</sup>, XU Jun-jie<sup>1</sup>, LAI Jian-hua<sup>3</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Key Laboratory of Specially Functional Materials and Advanced Manufacturing Technology of Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Technology Center, Tapai Group Limited Company, Meizhou 514000, China)

**Abstract:** The permeability of pavement concrete prepared with low-heat Portland cement and ordinary Portland cement in the same mix proportion is measured according to water permeability pressure test and rapid chloride penetrability test (ASTM C1202), and the factors that caused different results are analyzed. It is shown that passed electric quantity of the pavement concrete prepared with low-heat cement is more and its impermeability is poorer than that prepared with ordinary Portland cement. Water permeability pressure test results show that its impermeability is not as good as ordinary Portland cement pavement concrete at 28 d age. But its impermeability is a little better than that prepared with ordinary Portland cement after 60 d age and the disparity between them is not too large. The water permeability pressure test factually reflects the pore structure of concrete and the results tested by rapid chloride penetrability is not accurate because of the  $\text{Cl}^-$  absorption of paste hydration products.

**Key words:** low-heat cement; impermeability; rapid chloride penetrability test; water permeability pressure test